



طراحی آشکارساز نوری مبتنی بر گرافن با جذب و قابلیت پاسخ دهی بالا

محمد حسین مهدابی نژاد، مریم پور محی آبادی

دانشگاه شهید باهنر کرمان، دانشکده فنی، بخش مهندسی برق

mohammadmnejad@yahoo.com, Maryam.mahyabadi@gmail.com

چکیده - در این مقاله، ساختار جدیدی از آشکارسازهای نوری که از لایه های متناوب گرافن و سیلیکا بر روی یک لایه فلز با شیارهای حلقوی سیلیکا تشکیل شده است، ارائه می شود. در این طرح، تشدید پلاسمونهای سطحی نزدیک به شیارهای حلقوی، باعث افزایش جذب نور در لایه گرافن می شود. نتایج تحلیل عددی نشان می دهد که جذب در لایه گرافن از ۳٪ به ۵۴۷٪ و ماگزیمم جذب برای ۳ لایه گرافن تا ۷۸۰٪ در محدوده طول موج باند C مخابراتی افزایش می یابد. ماگزیمم جذب به عمق شیارها، شعاع حلقه ها و تعداد لایه ها بستگی دارد. همچنین در این آشکارساز، جریان نوری و پاسخ دهی نوری به ترتیب به ۵۰mA و ۱۰۰ A/W در بایاس ۵/۱V- و در طول موج ۵۵۵/۱μm به دست آمد. کلید واژه- گرافن، آشکارساز نوری، پاسخ دهی نوری، جریان نوری، پلاسمونیک.

Design of Graphene Based Photodetector with High Absorption and Responsivity

Mohammad Hossein Mahdabi nezhad, Maryam Pourmahyabadi

Electrical Engineering Department, Shahid Bahonar University of Kerman

Abstract- In this paper, a novel structure of photodetector consisting of periodic layers of graphene and silica located on a metal film with groove rings of silica is proposed. The excited localized Plasmon resonance in groove rings makes a strong enhancement of light absorption in the graphene layer. The numerical results revealed that the graphene absorption increases from 2.3% to 47.5% and even in three-layer graphene, increases up to a maximum value of 80.7% in the C band. In addition, the absorption peak is dependent on the groove depth and ring radius as well as the number of graphene layers. Also, a photoresponsivity of 100A/W and photocurrent of 50mA at -1.5V bias and at wavelength of 1.55μm are achieved.

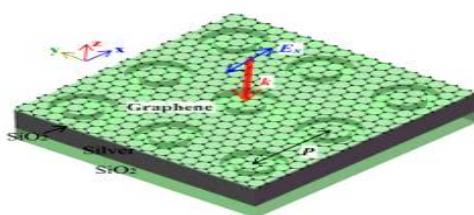
Keywords: Graphene, Photodetector, Photoresponsivity, Photocurrent, Plasmonic.

۱- مقدمه

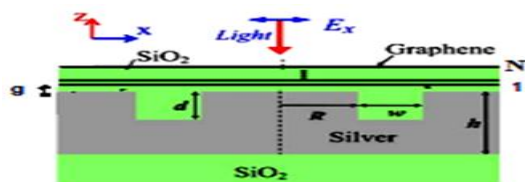
کردند [۳]. ژائو و همکارانش از گریتنینگ فلزی جهت افزایش جذب نور در گرافن استفاده کردند [۵]. ژو و همکارانش دریافتند که تزویج پلاسمونیک آرایه‌ای از حفره‌های توخالی در حد نانو در محدوده نور مرئی، جذب نوری گرافن را تا ۳۰٪ افزایش می‌دهد [۶]. گزارش‌های بالا نشان می‌دهند که پلاسمونیک در نانو ساختارهای فلزی به طور بالقوه جهت بهبود جذب نور در گرافن استفاده شده است.

۲- طراحی آشکارساز نوری

در اینجا، ساختار جدیدی از آشکارسازهای نوری که از لایه‌های متناوب گرافن و سیلیکا بر روی یک لایه فلز با شیارهای حلقوی سیلیکا تشکیل شده است، ارائه می‌شود. شکل ۱ نمودار سه بعدی و برش عرضی ساختار مورد استفاده در آشکارساز نوری مبتنی بر گرافن را نشان می‌دهد.



(الف)



(ب)

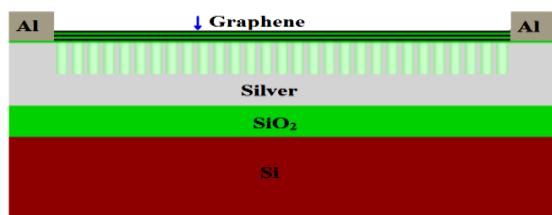
شکل ۱: (الف) نمودار سه بعدی ساختار مورد استفاده در آشکارساز نوری (ب) برش عرضی یک سلول واحد از ساختار تناوبی گرافن و سیلیکا.

در این ساختار عرض شیارها w ، عمق شیارها d ، شعاع داخلی شیارها R و پریود شیارها p می‌باشند. فلز بکار رفته در این ساختار از جنس نقره می‌باشد که ثابت گذر دهی آن با استفاده از مدل Drude از رابطه زیر تعریف می‌شود:

$$\varepsilon(\omega) = \varepsilon_{\infty} - \frac{\omega_p^2}{\omega^2 + i\omega\gamma} \quad (1)$$

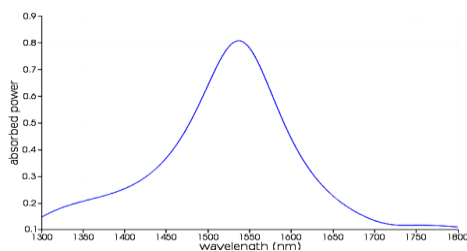
در این رابطه ε_{∞} ثابت دی الکتریک، ω_p فرکانس پلاسما،

آشکارساز نوری یکی از بلوکهای تشکیل دهنده اتصالات نوری - الکترونیکی است که عمل تبدیل سیگنال نوری به الکتریکی را انجام می‌دهد. آشکارسازهای نوری سیلیکونی به طور گسترده در رنج طیف مرئی به کار گرفته شده‌اند [۲]. این آشکارسازها، برای آشکارسازی تابشهای نزدیک مادون قرمز (NIR) مناسب نیستند، زیرا انرژی فوتونهای NIR ($0.78 \text{ eV} - 1.98 \text{ eV}$) در طول موجهای مخابراتی برای اینکه بر شکاف انرژی سیلیکون غلبه کنند، مناسب نیستند. در نتیجه تولید زوج الکترون - حفره در اثر تابش، محدود و هیچ جریان نوری تولید نمی‌شود. در سالهای اخیر، صنعت ادوات نوری از ترکیب سیلیسیم با ژرمانیوم و ادغام با نیمه هادی-های گروه ۳ و ۵ جدول تناوبی، جهت غلبه بر این مشکل استفاده کردند. اما این روشها به فرآیند ساخت پیچیده و پیشرفته نیاز دارند و با تکنولوژی CMOS سازگار نیستند، لذا از گرافن در آشکارسازهای نوری استفاده کردند. گرافن یک صفحه کربنی دو بعدی است که ساختار شبکه آن به صورت لانه زنبوری است و تنها به اندازه یک اتم ضخامت دارد. گرافن خواص نوری، الکترونیکی و گرمایی بی‌شماری دارد. الکترونهای پخش شده در گرافن همانند فرمیونهای دیراک بدون جرم، با رابطه خطی انرژی - اندازه حرکت رفتار می‌کنند و باعث افزایش تحرک پذیری حاملهای گرافن در دمای محیط تا 10^5 cm/Vs و دردمای پایین تا 10^6 cm/Vs می‌شود. ضریب جذب گرافن نسبت به سایر نیمه‌هادی مرسوم بیشتر است، هدایت حرارتی بالا (5000 W/mK) برای تک لایه گرافن و شکاف انرژی صفر، از خواص دیگر گرافن می‌باشند که باعث شده از گرافن در ادوات از قبیل آشکارسازهای نوری، سلولهای خورشیدی و دیودهای انتشار دهنده نور و ... استفاده شود. شایان ذکر است که گرافن با وجود جذب نوری بالا که بستگی به طول اندرکنش کوتاه آن با نور دارد فقط $2/3\%$ نور مرئی تا مادون قرمز را جذب می‌کند. این مقدار جذب نوری در گرافن برای کاربردهای آشکارسازی کافی نیست. اخیراً از تکنولوژیهای نوری جهت بهبود جذب نوری گرافن استفاده شده است. اشتر مایر و همکارانش لایه گرافن را با نانو ساختارهای پلاسمونیک ترکیب کردند که کارایی آشکارسازهای گرافنی را افزایش داد [۱]. اباجو و همکارانش از الگودهی گرافن به صورت پریودیک جهت بهبود جذب نور در محدوده نور مادون قرمز استفاده



شکل ۲: شماتیک آشکارساز نوری طراحی شده.

شکل (۳) جذب نور در سه لایه گرافن را نشان می دهد که ماگزیمم آن در طول موج $536/1 \mu m$ برابر $7/80\%$ بوده و تقریباً ۳۵ برابر جذب نوری در گرافن تنها است.



شکل ۳: جذب نور در سه لایه گرافن بر حسب طول موج.

پلاسمونیک در نانو ساختارهای فلزی به طور بالقوه جذب نور در گرافن را بهبود می بخشند. جذب نور در این ساختار بستگی به افزایش میدان نزدیک، محبوس کردن بالای نور و تشدید پلاسمونهای سطحی نزدیک شیارهای حلقوی دارد و باعث افزایش اندرکنش نور با گرافن می شود. با توجه به تئوری مودهای تزویج شده موقتی (-temporal coupled-mode theory) در این ساختار جذب نور در لایه گرافن از رابطه زیر بدست می آید [۴]:

$$A_{gr} = \frac{4\gamma_e\gamma_g}{(\omega - \omega_o)(\gamma_e + \gamma_g + \gamma_m)} \quad (4)$$

γ_e نرخ واپاشی میدان که بستگی به فرار انرژی به فضای خارج دارد، γ_g و γ_m نرخ واپاشی ناشی از تلفات جذبی گرافن و تلفات فلز می باشد. در این آشکارساز اولاً به منظور افزایش جذب نور در گرافن از نانوساختارهای پلاسمونیک (شیارهای حلقوی فلزی) و سه لایه گرافن استفاده شده است. ثانیاً جهت جلوگیری از باز ترکیب حاملهای تولید شده در اثر نور از اتصال فلز - گرافن و ساختار نامتجانس گرافن، شامل لایه های گرافن که توسط یک لایه اکسید به عنوان لایه تونلی مدفون شده نازک از هم جدا شده اند، استفاده شده است. تحت شدت نور ورودی، حاملهای داغ برانگیخته (الکترون - حفره) بر اثر تونل زنی کوانتومی از هم جدا شده و به لایه گرافن مخالف می روند، بنابراین باز ترکیب حاملهای داغ

γ فرکانس برخورد الکترونها و ω فرکانس زاویه ای نور فرودی می باشند. هدایت گرافن از رابطه کوبو و ثابت گذردهی آن به صورت زیر تعریف می شوند:

(۲)

$$\sigma_g = \sigma_{intra} + \sigma_{inter}$$

$$\sigma_{intra} = i \frac{e^2 K_B T}{\pi^2 (\omega + i\tau^{-1})} \left[\frac{\mu_c}{K_B T} + 2 \ln \left(\exp \left(-\frac{\mu_c}{K_B T} \right) + 1 \right) \right]$$

$$\sigma_{inter} = i \frac{e^2}{4\pi\hbar} \ln \left[\frac{2|\mu_c| - \hbar(\omega + i\tau^{-1})}{2|\mu_c| + \hbar(\omega + i\tau^{-1})} \right]$$

$$\varepsilon_g = 1 + i \frac{\sigma_g}{\omega \varepsilon_0 \Delta}$$

(۳)

در این رابطه τ زمان استراحت حامل ها، μ_c پتانسیل شیمیایی، e بار الکترون، $\hbar$ ثابت پلانک کاهش، Δ ضخامت گرافن و ω فرکانس زاویه ای می باشد.

۳- نتایج تحلیل عددی

جهت تحلیل و آنالیز ساختار آشکارساز نوری از روش FDTD استفاده شده است. در تحلیل عددی، شرایط مرزی در جهت x و y به صورت پریودیک و در جهت z به صورت PML انتخاب شده اند. یک منبع نور صفحه ای با میدان الکتریکی در جهت x، بالای آشکارساز قرار داده شده است. پارامترهای ساختار $R=200nm$ ، $d=200nm$ ، $w=55nm$ ، $g=1nm$ ، $P=700nm$ و ضخامت فلز $h=400nm$ در نظر گرفته شده است. پارامترهای نقره $\varepsilon_\infty = 3/7$ ، $\varepsilon_0 = 9/1ev$ و $\omega_p = 9/1ev$ ، $\gamma = 0/018ev$ ثابت گذردهی سیلیکا $\varepsilon = 2/25$ و پارامترهای گرافن $\mu_c = 0/15ev$ ، $\Delta = 0/5nm$ ، $T=300K$ و $\tau = 0/5ps$ تعریف می شوند. شکل ۲ شماتیک آشکارساز نوری ارائه شده را نشان می دهد. این آشکارساز یک ترانزیستور نوری FET می باشد که در آن از سه لایه گرافن استفاده شده است. در این ساختار لایه های گرافن به صورت پشته بر روی هم قرار گرفته و توسط لایه های سیلیکا از هم جدا شده و در کل ساختار نامتجانسی را تشکیل می دهند.

جدول ۱ مقایسه مقادیر پاسخ‌دهی و جریان آشکارساز پیشنهادی با آشکارسازهای نوری

جریان نوری	پاسخ دهی نوری	توان یا شدت ورودی	مراجع
۷۶۵/۲mA	۱/۰ A/W	۸۰ mW/cm ²	[۷]
۴۵/۰ μA	۹/۰ mA/W	۵/۰ mW	[۸]
۱۳۷/۰ mA	۲۷۳/۰ A/W	۵/۰ mW	[۹]
۲۲۲/۰ μA	۳۷/۰ A/W	۶/۰ μW	[۱۰]
۵۰ mA	۱۰۰ A/W	۵/۰ mW	در این طرح

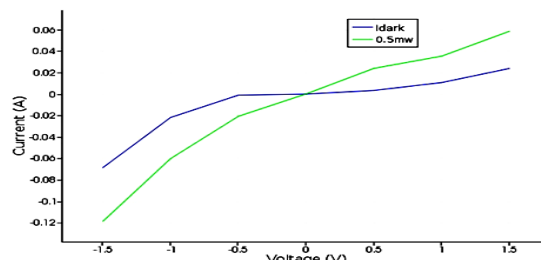
۴- نتیجه‌گیری

در این مقاله، طرح یک آشکارساز نوری با لایه‌های متناوب گرافن و سیلیکا بر روی یک لایه فلز با شیارهای حلقوی سیلیکا تشکیل شده است، ارائه شد. نتایج نشان داد که این آشکارساز، در قیاس با آشکارسازهای موجود از عملکرد بهتری برخوردار بوده و دارای جریان نوری و پاسخ دهی نوری به ترتیب به ۵۰ mA و ۱۰۰ A/W در بایاس ۵/۱V- و در طول موج ۵۵/۱ μm است.

مراجع

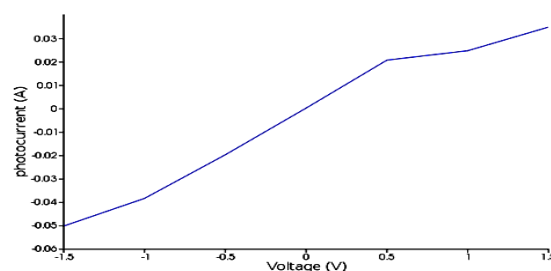
- [1] T. Echtermeyer, L. Britnell, P. Jasnios, A. Lombardo, R. Gorbachev, A. Grigorenko, A. Geim, A. Ferrari, and K. Novoselov, "strong plasmonic enhancement of photovoltage in graphene", Nat. Commun., 2, 458, 2011.
- [2] Sze, S. M., Kwok, K. N, "Physics of semiconductor devices", Wiley, New York, 2006.
- [3] S. Thongrattanasiri, F. Koppens, and F. Abajo, "Total light absorption in graphene", Phys. Rev. Lett. 108, 047401, 2012.
- [4] S. Fan, W. Suh, and J. Joannopoulos, "Temporal coupled-mode theory for the Fano resonance in optical resonators", Opt. Soc. Am. A 20, 569, 2003.
- [5] B. Zhao, J. M. Zhao, and Z. M. Zhang, "Enhancement of near-infrared absorption in graphene with metal gratings", Appl. Phys. Lett. 105, 031905, 2014.
- [6] X. Zhu, L. Shi, M. Schmidt, A. Boisen, O. Hansen, J. Zi, S. Xiao, and N. Mortensen, "Enhanced light-matter interactions in graphene covered gold nanovoid arrays", Nano. Lett., 13, 4690, 2013.
- [7] Basant Chitara, L. S. Panchakarla, S. B. Krupanidhi, and C. N. R. Rao, "Infrared Photodetectors Based on Reduced Graphene Oxide and Graphene Nanoribbons", 23, 5419-5424, 2011.
- [8] Zhenzhou Cheng, Jiaqi Wang, Ke Xu, Hon Ki Tsang, Chester Shu, "Graphene on Silicon on-Sapphire Waveguide Photodetectors", Optoelectronics, 130, 0250, 2015.
- [9] Jiaqi Wang, Zhenzhou Cheng, Zefeng Chen, Xi Wan, Bingqing Zhu, Hon Ki Tsang, "High responsivity graphene-on-silicon slot waveguide photodetectors", 2016.
- [10] Ilya Goykhman, Ugo Sassi, Boris Desiatov, Noa Mazurski, "On chip integrated silicongraphene plasmonic Schottky photodetector with high responsivity and avalanche photogain", Nano Letters, 2016.
- [11] Chang Hua Liu, You Chia Chang, Theodore B. Norris, and Zhaohui Zhong, "Graphene photodetectors with ultra broadband and high responsivity at room temperature", nature nanotechnology, 2014.

مینیمم می‌شود. با اعمال یک میدان الکتریکی خارجی این حامل‌های نور از هم جدا شده و به الکترودهای مخالف می‌روند و یک جریان و پاسخ دهی نوری بی‌نظیر را بوجود می‌آورد [۱۱]. شکل (۴) جریان تاریک و جریان تحت تابش آشکارساز را بر حسب ولتاژ نشان می‌دهد.



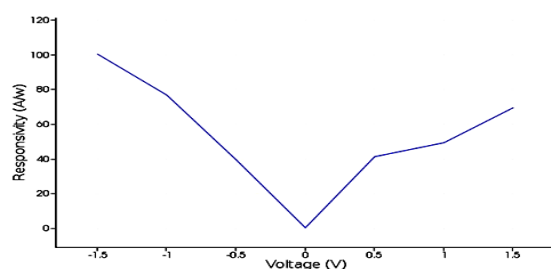
شکل ۴: جریان تحت تابش و تاریک آشکارساز بر حسب ولتاژ

جریان خالص نوری که از تفریق جریان تاریک و جریان تحت تابش به دست می‌آید نیز در شکل (۵) نشان داده شده است.



شکل ۵: جریان نوری آشکارساز بر حسب ولتاژ.

با توجه به شکل، بیشینه جریان نوری در بایاس ۵/۱V-، برابر ۵۰ mA است. در نتیجه پاسخ دهی نوری این آشکارساز ۱۰۰ A/W خواهد بود. شکل (۶) پاسخ دهی آشکارساز بر حسب ولتاژ را نشان می‌دهد.



شکل ۶: پاسخ دهی نوری آشکارساز بر حسب ولتاژ.

جدول ۱ مقایسه پاسخ‌دهی و جریان نوری چند آشکارساز در محدوده طول موج مخابراتی ۵۵/۱ μm با طرح ارائه شده را نشان می‌دهد که حاکی از برتری آشکارساز طراحی شده به طرح‌های موجود است.